8 月 August
2020, 63(8): 973 - 980

昆 虫 学 报
ACTA ENTOMOLOGICA SINICA

http: //www. insect. org. cn
doi: 10.16380/j. kcxb. 2020. 08. 007

黑刺粉虱危害对黄金芽茶叶生化成分含量及抗氧化酶活力的影响

李程锦[1], 宋长远[1], 王 鹏[2], 陈珍珍[1], 许永玉[1,*]

(1. 山东农业大学植物保护学院, 山东泰安 271018;
2. 山东省烟台市农业科学研究院, 山东烟台 265500)

摘要:【目的】明确黑刺粉虱 *Aleurocanthus spiniferus* 为害对茶叶生化物质含量及抗氧化酶活性的影响,为精准、安全、高效、绿色防治黑刺粉虱,提高茶叶品质提供参考。【方法】测定黑刺粉虱为害不同级别下黄金芽芽下第 3 叶中生化成分(茶多酚、可溶性糖、游离氨基酸、咖啡碱、儿茶素)含量及 3 种抗氧化酶(SOD, POD 和 CAT)活性的变化。【结果】随着黑刺粉虱为害等级的提高,黄金芽芽下第 3 叶中茶多酚的含量显著性降低,且以为害级别为Ⅳ级时最低,为 18.82% ±0.21%,而游离氨基酸、咖啡碱、可溶性糖和儿茶素的含量在不同的为害级别间均无显著性变化。黄金芽芽下第 3 叶中 POD 和 CAT 活力随着黑刺粉虱为害等级的增加先显著升高后很快降低,均以为害等级Ⅰ时活性最高,分别为 57.14 ±3.98 和 28.05 ±0.40 U/mg pro。SOD 活力呈显著下降趋势,且以为害等级Ⅳ时 SOD 活力最低,为 442.73 ±10.54 U/mg pro。【结论】黑刺粉虱为害对黄金芽茶叶中与抗性提高相关的生化物质咖啡碱、儿茶素含量均没有显著性影响,与抗逆补偿相关的游离氨基酸和可溶性糖含量也没有显著性变化,但茶多酚含量显著降低,3 种抗氧化酶活性随为害等级升高呈现先升高后显著降低的趋势,说明黄金芽对黑刺粉虱的抵抗力较弱,需要加强黄金芽上黑刺粉虱发生的科学管理。

关键词: 黑刺粉虱; 黄金芽; 为害等级; 生化成分; 抗氧化酶; 抗虫性

中图分类号: Q966　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 0454-6296(2020)08-0973-08

Effects of *Aleurocanthus spiniferus* (Hemiptera: Aleyrodidae) infestation on the contents of biochemical components and the activities of antioxidant enzymes in the leaves of Huangjinya tea

LI Cheng-Jin[1], SONG Chang-Yuan[1], WANG Peng[2], CHEN Zhen-Zhen[1], XU Yong-Yu[1,*] (1. College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271017, China; 2. Yantai Academy of Agricultural Science, Yantai, Shandong 265500, China)

Abstract:【Aim】To clarify the influence of *Aleurocanthus spiniferus* infestation on the contents of biochemical substances and activities of antioxidant enzymes in tea leaves, so as to provide references for acurate, safe, efficient and green control of *A. spiniferus* to improve tea quality.【Methods】The contents of biochemical components including tea polyphenol, soluble sugars, free amino acids, caffeine and catechin and the activities of three antioxidant enzymes (SOD, POD and CAT) in the 3rd leaves of Huangjinya tea (*Camellia sinensis* cv. Huangjinya) damaged by *A. spiniferus* at different levels were determined.【Results】With the increase of the damage level of *A. spiniferus*, the content of tea

基金项目: 山东省茶叶产业技术体系项目(SDAIT-19-04)
作者简介: 李程锦, 男, 1994 年生, 山东威海人, 硕士研究生, 研究方向为昆虫生理生态, E-mail: sdaulcj@163.com
* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xuyy@sdau.edu.cn
收稿日期 Received: 2019-12-17; 接受日期 Accepted: 2020-04-22

polyphenol in the 3rd leaves of Huangjinya tea decreased significantly and was the lowest (18.82% ± 0.21%) when the damage level was IV, while the contents of the free amino acids, caffeine, soluble sugars and catechin did not change significantly. The activities of POD and CAT in the 3rd leaves of Huangjinya tea firstly increased significantly and then decreased as the damage level increased, and were the highest at the damage level I, being 57.14 ± 3.98 and 28.05 ± 0.40 U/mg pro, respectively. The SOD activity decreased significantly with the increase of the damage level, and was the lowest (442.73 ± 10.54 U/mg pro) when the damage level was IV. 【Conclusion】There is no significant change in the contents of caffeine and catechins related to insect resistance and the contents of free amino acids and soluble sugars related to stress compensation in the leaves of Huangjinya tea damaged by *A. spiniferus*. However, the content of tea polyphenol decreases significantly, and the activities of the three antioxidant enzymes increase firstly and then decrease significantly as the damage level increases, suggesting that the resistance of Huangjinya tea to *A. spiniferus* infestation is quite low and the scientific management of *A. spiniferus* on Huangjinya tea needs to be strengthened.

Key words: *Aleurocan spinfetus*; *Camellia sinensis* cv. Huangjinya; damage level; biochemical components; antioxidant enzymes; insect resistance

植物在长期进化过程中形成了复杂的防御系统,大量的研究表明,植物在遭受昆虫取食后,其体内的生理生化及代谢可发生相应的改变,引起植物体内与防御有关物质含量的变化。茶树体内含有大量的生物活性成分,如多酚类物质、生物碱、糖类、氨基酸等,这些成分中有些在昆虫取食后不利于昆虫生长发育抑制了昆虫的繁殖,使茶树对昆虫产生了抗性。咖啡碱是茶叶中重要的内含成分,虽然没有证据表明咖啡碱能直接影响昆虫的生长发育,但通过对侧多食跗线螨 *Polyphagotarsonemus latus*(刘奕清等, 1999)、假眼小绿叶蝉 *Empoasca vitis*(毛迎新等, 2009)的研究均发现咖啡碱含量高的茶树品种抗虫性较强。茶多酚是茶树体内多种酚类及其衍生物的总称,具有浓烈的苦涩味和收敛性,可引起害虫的拒食,从而起到保护茶树的作用(张贻礼等, 1999),儿茶素作为多酚类的一种,对叶螨类害虫有一定的忌避作用(谭济才和邓欣, 1994)。茶树所含氨基酸种类繁多,其中有些氨基酸可对昆虫发育产生负面影响,如高浓度的谷氨酸、甘氨酸、丝氨酸、苏氨酸等对昆虫生长发育有较强的抑制作用,这些氨基酸含量高的茶树品种表现出较强的抗虫性(刘奕清等, 1999)。糖分是昆虫必需的营养成分,可溶性糖含量高的茶树品种更有利于昆虫的生长繁殖,被害指数高,品种抗虫性较弱,反之害虫发育不良、繁殖率下降,茶树品种表现出抗虫性(许宁等, 1996; 刘奕清等, 1999; 张贻礼等, 1999)。当植物受到昆虫或其他不利环境条件的胁迫时,活性氧物质会在体内产生并积聚,对机体产生毒害作用。植物体内的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和其他氧化酶可以有效地清除这些自由基并抑制活性氧物质对植物的伤害,提高机体的抗压能力(刘明杨等, 2016)。

随着山东茶区茶叶种植面积的不断扩大,害虫的种类逐渐增多,为害程度逐渐加重。文献研究和目前田间调查可以看出,自 2004 年至今,黑刺粉虱 *Aleurocanthus spiniferus* 在山东茶园发生较为普遍,在局部茶园危害重,是山东茶园的主要害虫之一(郭见早和冯志花, 2004; 邱忠莲和袁洪刚, 2005; 段永春等, 2010)。黑刺粉虱隶属半翅目(Hemiptera)粉虱科(Aleyrodidae),除直接刺吸为害外,其排泄物产生的茶煤病 *Neocapnodium theae* 也会降低茶树叶片的光合作用,影响茶树的生长。黑刺粉虱成虫喜欢聚集在未完全展开的嫩叶上刺吸为害,且偏好在茶树上部幼嫩叶片产卵,卵孵化后除 1 龄幼虫可以活动外,其余幼虫阶段均固着刺吸为害,可直接影响茶叶的产量和品质。黄金芽 *Camellia sinensis* cv. Huangjinya 为 1998 年由浙江余姚市德氏茶场发现的自然黄化变异单株培育而成的珍稀黄化茶树品种,可采制名优茶,其新稍伸展能力大,芽体较小,目前通过引种栽培,已成为可在山东种植的优良品种。本研究团队前期调查发现,黑刺粉虱在黄金芽品种上的发生量高于其他品种。为探求黑刺粉虱为害和黄金芽生长发育间的关系,本研究测定分析了黑刺粉虱不同为害程度对茶叶中茶多酚、可溶性糖、游离氨基酸、咖啡碱、儿茶素等生化成分含量和 3 种抗氧化酶(SOD, POD 和 CAT)活性的影响,对全面了解

黑刺粉虱在黄金芽上的动态规律、黄金芽受害后的反应和两者间的互作关系提供基础，同时也为该虫在茶园的科学防控提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试茶树

试验地点为泰安市道朗镇茶溪谷茶园（36°12′48.09″N, 116°56′4.27″E），园内以黑刺粉虱和小绿叶蝉为主要发生害虫，尤其以黑刺粉虱发生严重。近几年来，我们指导茶园经营者在非采茶期使用联苯聚酯压低虫口密度，而后通过使用黄板诱杀成虫，茶园适时台刈以及喷洒苦参碱、藜芦碱等绿色防控措施，黑刺粉虱的危害得到了较好的控制。目前茶园内局部茶丛发生较重，可能是由于茶园园区内种植红叶石楠、樱花、松树、柿子树等造成环境郁闭引起的。试验茶树为 5 年生黄金芽。

1.2　茶树叶片样品收集

采样方法参考 Tian 等（2018）以芽下第 3 片叶片观察小贯小绿叶蝉 *Empoasca onukii* 刺吸为害对茶树的影响的方法，于 2018 年 9 月份采集黑刺粉虱幼虫为害不同级别的黄金芽茶树芽下第 3 片叶片。按照在叶片上固着不动的 2 龄、3 龄幼虫的数量进行黑刺粉虱为害等级的划分，共分为 5 个级别：Ⅰ级 1～20 头，Ⅱ级 20～40 头，Ⅲ级 40～60 头，Ⅳ级大于 60 头。以未经黑刺粉虱危害的芽下第 3 片叶片作为对照（CK），每个级别和对照分别采 200 个叶片备用。

1.3　茶叶生化成分含量测定

将部分采集的茶叶于 110℃微波杀青 5 min 后，80℃烘干，并用磨碎机细磨成粉末后经 60 目筛网筛除杂质。每个生物学重复称取储备的样品 3.0 g 放入 500 mL 锥形瓶中，加入 450 mL 沸水，然后将其置于沸水浴中浸提 45 min，每 10 min 振荡一次。浸提完毕后，趁热减压过滤。残渣用少量热蒸馏水洗涤 2～3 次，待茶汤冷却至室温后用蒸馏水定容至 500 mL，备用。每个生化成分含量的测定均设 3 个生物学重复。

茶多酚的测定按国家标准（GB/T 8313-2008）进行测定。吸取备用茶汤 1.0 mL，注入 25 mL 容量瓶中，加入 4.0 mL 蒸馏水、5.0 mL 酒石酸亚铁溶液，充分混匀，再用 pH 7.5 磷酸盐缓冲液定容至刻度。以试剂空白溶液作参比，在波长 540 nm 处测定吸光度。

游离氨基酸含量按照国家标准（GB/T 8314-2013）进行测定。准确吸取备用茶汤 1.0 mL，注入 25 mL 容量瓶中，加入 0.5 mL 的 2% 茚三酮溶液和 0.5 mL 的 pH 8.0 磷酸缓冲液，摇匀于沸浴中加热 15 min，取出冷却至室温后用蒸馏水定容至刻度，静置 10 min 后，以试剂空白溶液作参比，在波长 570 nm 处测定吸光度。

咖啡碱含量按照国家标准（GB/T 8312-2013）进行测定。准确吸取 8.0 mL 茶汤于 100 mL 容量瓶中，加入 4.0 mL 0.01 mol/L 盐酸溶液和 0.8 mL 碱式醋酸铅溶液，用水定容至刻度，混匀静置后过滤。取滤液 50 mL 于 100 mL 容量瓶中，加入 0.2 mL 4.5 mol/L 硫酸溶液定容至刻度，混匀静置后过滤。以试剂空白溶液作参比，在 274 nm 波长处测定吸光度。

儿茶素总量测定采用香荚兰素比色法进行测定。称取磨碎的茶样 1 g（精确至 0.01 g），加 20 mL 95% 乙醇，在 80℃～85℃水浴上提取 30 min，使乙醇保持微沸。过滤冷却后用 95% 乙醇定容至 25 mL。吸取 10 μL 试液，加入盛有 1 mL 95% 乙醇的刻度试管中。摇匀后加入 5 mL 1% 香荚兰素盐酸溶液，加塞摇匀显红色。静置 40 min，以试剂空白作参比，在 500 nm 波长处测定吸光度。

可溶性糖含量的测定采用蒽酮法进行测定。吸取 1 mL 茶汤于 25 mL 容量瓶再加入 8 mL 蒽酮试剂，摇匀于沸水浴中加热 7 min，立即取出于冷水中冷却至室温。于波长 620 nm 处测定吸光度，空白对照以 1 mL 水替代茶汤。

1.4　茶叶抗氧化酶活性的测定

将采集到的不同为害级别的黄金芽叶片鲜叶按重量体积比（g∶mL）为 1∶9（CAT）、1∶4（SOD）、1∶9（POD）的比例加入生理盐水研磨匀浆后，25℃ 2 500 r/min离心 10 min，取上清用于组织匀浆蛋白浓度及酶活性测定。每处理均设 3 个生物学重复。

组织匀浆蛋白浓度测定：根据检测试剂盒考马斯亮蓝法（南京建成生物工程研究所）测定各样品中的匀浆蛋白浓度。

CAT, SOD 和 POD 的活力测定严格按照检测试剂盒（南京建成生物工程研究所）进行。根据说明中的公式计算活力值。CAT, SOD 和 POD 的活力测定波长分别为 405, 550 和 420 mm。SOD 活性单位定义为每克组织在 1 mL 反应液中 SOD 抑制率达 50% 时所对应的 SOD 量为一个反应单位；POD 活力定义为在 37℃条件下，每毫克组织蛋白每 min 催化 1 μg 底物的酶量定义为一个酶活力单位；CAT 活力定义为每毫克组织蛋白每秒分解 1 μmol 的 H_2O_2 的量为一个活力单位。

1.5　数据分析

黑刺粉虱不同为害级别间生化成分及抗氧化酶

活力的差异用 SPSS19.0 软件进行分析。通过 Shapiro-Wilk 检验和方差同质性检验(homogeneity of variance test)分析数据分布的正态性和方差齐性，得到所有数据均为正态分布，方差具有同质性，随后进行单因素方差分析(one-way ANOVA)，对不同处理间的差异进行 Tukey HSD 多重比较分析($P < 0.05$)。

2 结果

2.1 黑刺粉虱为害不同级别下黄金芽茶叶生化成分含量的变化

随着黑刺粉虱刺吸黄金芽为害级别的增加，茶叶中茶多酚含量逐渐降低(图1)。除为害级别为Ⅰ

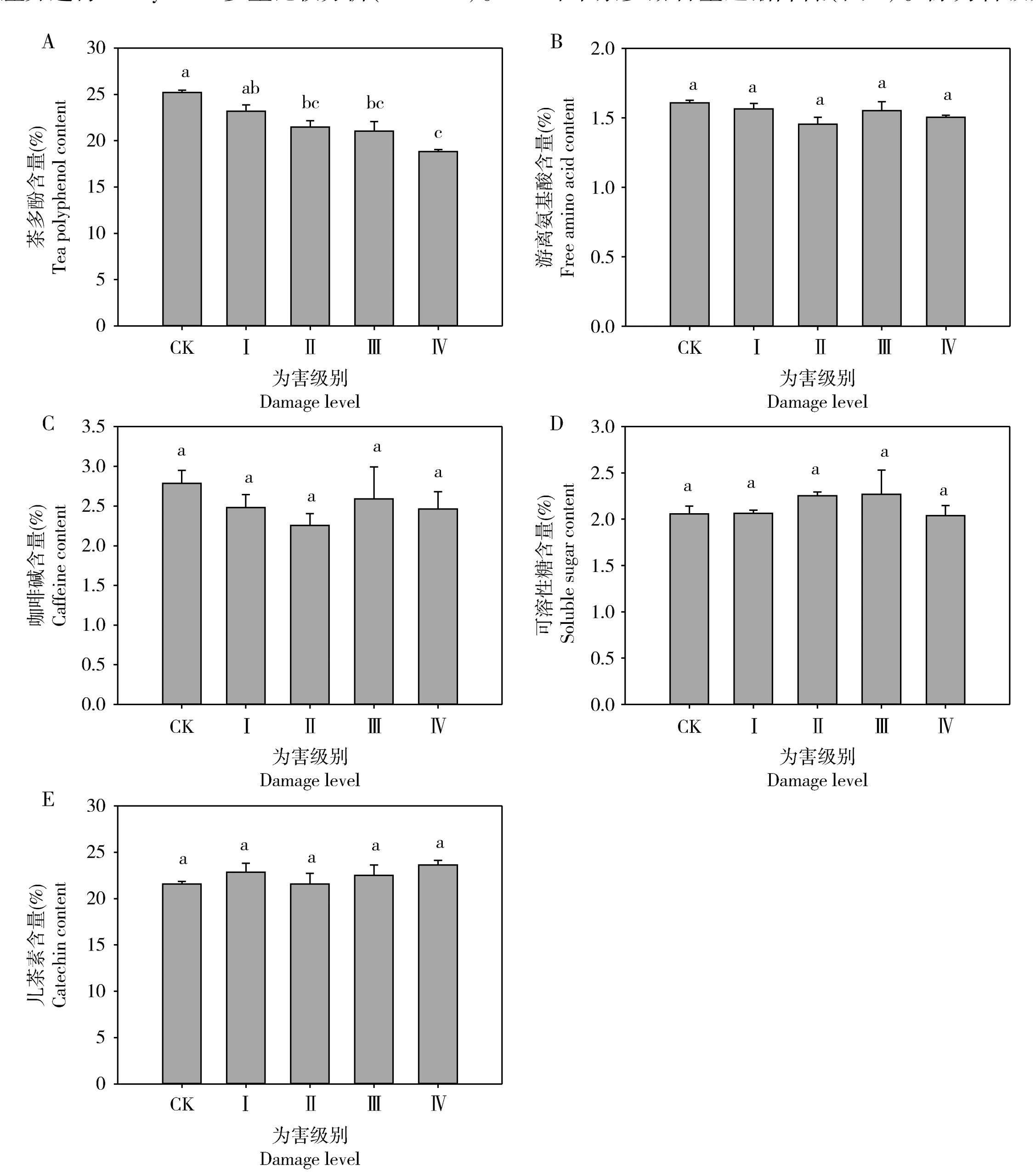


图1 黑刺粉虱为害不同级别下黄金芽芽下第3叶内生化成分含量的变化

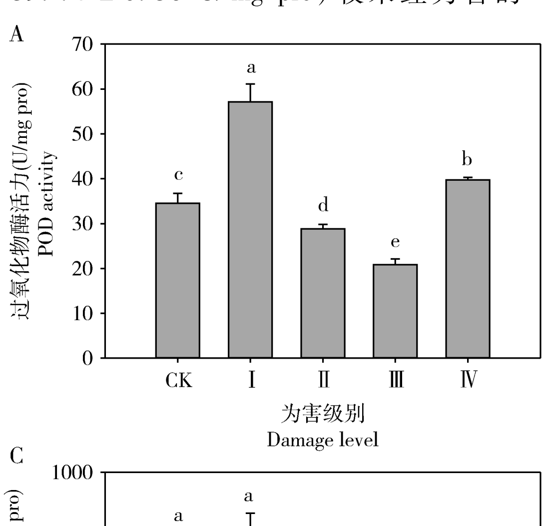
Fig. 1 Changes in the contents of biochemical components in the 3rd leaves of Huangjinya tea damaged by *Aleurocanthus spiniferus* at different levels

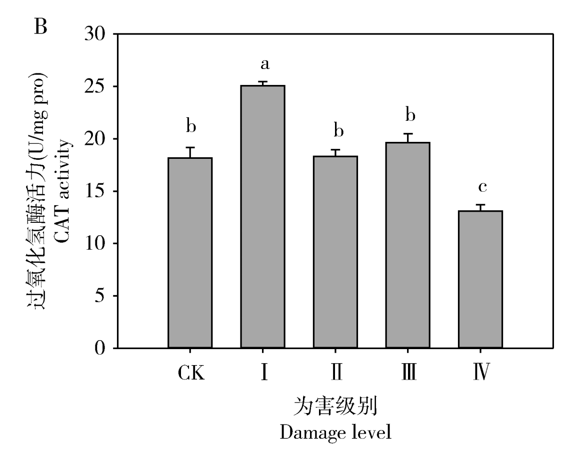
A：茶多酚含量 Tea polyphenol content；B：游离氨基酸含量 Free amino acid content；C：咖啡碱含量 Caffeine content；D：可溶性糖含量 Soluble sugar content；E：儿茶素含量 Catechin content. 图中的为害级别Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ和Ⅳ分别代表茶树芽下第3叶片上有黑刺粉虱幼虫1~20，20~40，40~60及60头以上，CK表示没有黑刺粉虱为害。图中数据为平均值±标准误，不同字母代表不同为害级别间在0.05水平上差异显著(单因素方差分析和Tukey氏HSD氏多重比较)。The damage levels Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ and Ⅳ in the figure represent that there are 1-20，20-40，40-60 and more than 60 larvae of *A. spiniferus* on the 3rd leaves of Huangjinya tea，respectively，and CK indicates that there is no damage caused by *A. spiniferus*. Data in the figure are means ± *SE*. Different lowercase letters indicate significant differences between different damage levels by one-way ANOVA and Tukey's HSD test at $P < 0.05$ level. 图2同 The same for Fig. 2.

级时的茶多酚含量(23.20% ±0.67%)与对照之间(25.21% ±0.23%)没有显著性差异($P=0.256$)外,其余各为害级别的茶多酚含量均显著低于未受到为害的($F_{4,10}=13.650$, $P<0.001$),且以危害级别为Ⅳ级时茶多酚含量最低,为 18.82% ±0.21%。黑刺粉虱为害不同级别对黄金芽茶叶中游离氨基酸、咖啡碱、可溶性糖及儿茶素含量的影响均无显著性差异(游离氨基酸：$F_{4,10}=2.001$, $P=0.170$；咖啡碱：$F_{4,10}=0.656$, $P=0.636$；可溶性糖：$F_{4,10}=0.734$, $P=0.589$；儿茶酚：$F_{4,10}=1.004$, $P=0.450$)。

2.2　黑刺粉虱为害不同级别下黄金芽茶叶抗氧化酶活力的变化

黑刺粉虱为害黄金芽后,当为害级别达到Ⅰ级和Ⅳ级时黄金芽茶叶中 POD 活力(分别为 57.14 ±3.98 和 39.74 ±0.56 U/mg pro)较未经为害的(34.51 ±2.20 U/mg pro)有显著的提高,而达到Ⅱ级(28.81 ±1.01 U/mg pro)和Ⅲ级(20.84 ±1.29 U/mg pro)时显著降低,各为害级别间的活力均存在显著性差异($F_{4,10}=140.348$, $P<0.001$)；当黑刺粉虱为害级别达Ⅰ级时黄金芽茶叶中 CAT 活力最高,为 28.05 ±0.40 U/mg pro,且显著高于其他为害等级,达到Ⅳ级(13.10 ±0.60 U/mg pro)时的活力显著降低($F_{4,10}=46.546$, $P<0.001$)；黄金芽茶叶中 SOD 活力随着黑刺粉虱为害等级的增加显著下降($P<0.05$),除为害级别为Ⅰ级时 SOD 活力(863.60 ±46.06 U/mg pro)与 CK(783.11 ±17.52 U/mg pro)相比无显著性差异($P>0.05$)外,其余为害等级间均存在显著性差异($F_{4,10}=171.668$, $P<0.001$),且以为害级别为Ⅳ级时 SOD 活力最低,为 442.73 ±10.54 U/mg pro。





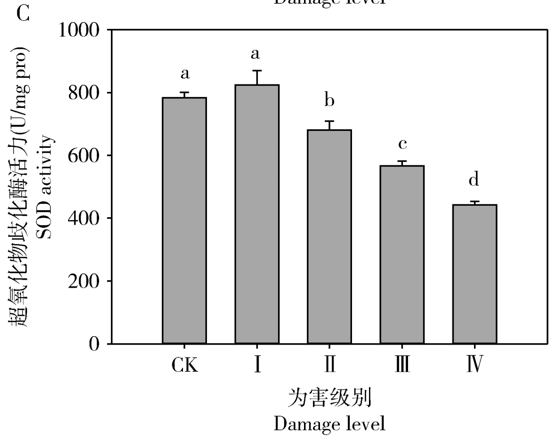


图 2　黑刺粉虱为害不同级别下黄金芽芽下第 3 叶内抗氧化酶活力的变化

Fig. 2　Changes in the activities of antioxidant enzymes in the 3rd leaves of Huangjinya tea damaged by *Aleurocanthus spinfetus* at different levels

A：过氧化物酶活力 POD activity；B：过氧化氢酶活力 CAT activity；C：超氧化物歧化酶活力 SOD activity.

3　讨论

3.1　黑刺粉虱为害对黄金芽茶叶生化成分含量的影响

茶树体内的茶多酚、游离氨基酸、咖啡碱、可溶性糖、儿茶素等物质的含量变化影响茶叶的口感和品质,也是茶树表现对害虫抗性的生化基础。本研究以黄金芽芽下第 3 叶为研究对象,依据是黑刺粉虱成虫产卵于新展开的嫩芽上,随着幼虫的孵化生长及新芽的出现而变成第 3 －4 叶,且第 3 －4 叶具

有相对较大的叶面积和较强的光合能力，干物质积累较大（王峰等，2016），其同化产物为新芽发育提供重要营养物质。本研究的结果可以看出，黑刺粉虱不同为害级别对茶叶内茶多酚、游离氨基酸、咖啡碱、可溶性糖、儿茶素含量的变化有不同的影响（图 1）。

植物被昆虫为害后，体内部分生化成分的种类及数量会有所改变，包括营养物质含量和次生代谢物的变化，而寄主植物的营养状况也是影响植食性昆虫的生长、发育和繁殖的重要因素，同时也是影响其寄主选择性的重要因素（陈常颂等，2007）。糖类是生物体内能量的主要来源，葛超美等（2018）研究发现，可溶性糖含量高的茶树品种被害指数高，茶树抗性品种新梢的含糖量明显低于易感品种。李传明等（2017）对烟粉虱的研究发现，辣椒叶片中可溶性糖含量随烟粉虱为害呈明显下降趋势，抗虫品种的下降幅度大于感虫品种。本研究的结果显示，黑刺粉虱为害不同等级下的黄金芽体内可溶性糖的含量与对照没有明显变化，可能是由于茶树自身应对虫害损失提高了自身的补偿能力。研究表明，在适当的条件下，植物可以通过一系列生理变化对虫害引起的损失进行补偿或超补偿（Trumble *et al*., 1993；Lennartsson *et al*., 1998），且茶树对茶尺蠖 *Ectropis obliqua* 取食危害的光补偿反应也印证了这一观点（童鑫等，2007）。植物中酚类被认为可以通过植食性昆虫取食诱导并参与植物的抗虫作用中去（Czerniewicz *et al*., 2017）；葛超美等（2018）研究灰茶尺蠖 *Ectropis grisescens* 对茶树的选择性研究发现其与茶树体内茶多酚含量呈负相关，说明茶多酚含量越高茶树抗性越强。本研究发现，茶叶受危害后，体内茶多酚的含量显著下降，可能也会降低茶叶对黑刺粉虱的抵抗能力，而且随着为害等级的增加茶多酚含量显著下降，抗性的降低也可能使黑刺粉虱发生加重。王敏（2016）对小绿叶蝉的研究也发现相似的变化趋势，即随着危害程度的提高茶多酚含量显著降低。此外，儿茶素是茶叶体内主要的酚类成分。冉伟等（2018）研究发现，茶尺蠖幼虫为害提高了茶树儿茶素合成途径的代谢强度和儿茶素类化合物的积累。本研究发现，黑刺粉虱为害黄金芽后体内儿茶素含量有一定的升高，但是与对照差异不显著（图 1），说明影响茶多酚含量显著降低是其他种类的酚酸类的减少造成的，需进一步研究。氨基酸是植食性昆虫的主要氮源之一，并且植食性昆虫取食添加氮元素的食物，通常会发育得更快而且能够更好地存活和繁殖（Mattson，1980；Woods，1999；Lee *et al*., 2002；Chen *et al*., 2009）。Tomczak（2001）研究发现二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 的为害会降低菊花叶片中游离氨基酸的浓度；对茶橙瘿螨的研究发现茶树新梢中氨基酸浓度较高时能在一定程度上能抑制其取食和繁殖，茶树抗性与氨基酸含量呈正相关（陈华才等，2000）；灰茶尺蠖幼虫也不喜食游离氨基酸含量高的叶片（葛超美等，2018）。本研究中黑刺粉虱的为害并没有引起黄金芽体内游离氨基酸含量的变化（图 1）。植物体内咖啡碱与植物的抗虫性可能存在一定的关系，Wang 等（2016）研究发现了 6 个茶咖啡因合成酶（Tcs）基因，并推断可能与抗虫性有关，黑刺粉虱为害后黄金芽体内咖啡碱的含量有所降低，但差异并不显著，咖啡碱是否影响茶树对黑刺粉虱的抗性还需要深入研究。

3.2 黑刺粉虱为害对黄金芽茶叶抗氧化酶活力的影响

植物通过抗氧化酶加强抗氧化作用提高对逆境的抗性，从而防止自由基毒害（Inbar *et al*., 1999；McKenzie *et al*., 2002）。刺吸式昆虫的刺吸为害会导致植物体内氧代谢的失调，体内活性氧物质的过度积累，造成生物膜的过氧化损伤，引起叶绿体、线粒体等细胞器的功能降低及 DNA 等其他大分子生物的降解和失活，最终引起细胞的凋亡（周丹丹等，2009）。一旦体内活性氧的含量超标，寄主植物便会启动自身的活性氧清除系统包括酶促活性氧清除系统（如 SOD，POD 和 CAT）和非酶促性活性氧清除剂（如类胡萝卜素）等，对氧化胁迫具有一定的适应及抵抗能力。受黑刺粉虱为害后黄金芽体内的 POD，CAT 和 SOD 活力随着为害等级的增加，均出现先升高后显著降低的变化趋势，且均在为害等级为 I 级时有最大值（图 2），这说明黄金芽对黑刺粉虱的为害并不能诱导形成明显的抗氧化能力。当为害等级达到 I 级，即黑刺粉虱刺吸为害较轻时，黄金芽体内的 POD 和 CAT 活性会迅速上升，可会及时将过剩的自由基清除；随着黑刺粉虱虫量增多，为害等级增加，产生自由基的速度可能已经超过 SOD，CAT 和 POD 的降解速度，使活性氧过度积累，造成生物膜的过氧化和叶绿体、线粒体等细胞器的功能损耗，导致黄金芽发育不良。

郑雨婷等（2017）通过对比不同茶树品种应对茶小绿叶蝉为害后体内抗性物质的变化，发现不同学者对茶树抗叶蝉性能与茶叶化学成分之间的说法不一致，需要进一步求证。本研究则是通过研究黑

刺粉虱密度增加是否会引起茶树自身防御物质的改变,从而判断茶树自身是否对黑刺粉虱为害有一定的防御能力。王庆森等(2009)测定了 12 种茶树叶片组织结构与黑刺粉虱的发生关系,并发现黑刺粉虱的生殖与存活与气孔密度呈显著的正相关,与叶片下表皮厚度呈显著的负相关。Tian 等(2018)测量叶片组织发现黄金芽栅栏组织厚度和海绵组织厚度均大于福鼎大白,这可能是田间黄金芽上黑刺粉虱发生量较大的原因,还需要进一步研究。

3.3 结语

综上所述,黑刺粉虱为害对黄金芽茶叶体内与抗性提高相关的生化物质咖啡碱和儿茶素含量,以及与抗逆补偿相关的游离氨基酸和可溶性糖含量均没有显著性影响,但茶多酚含量显著降低,3 种抗氧化酶活性随黑刺粉虱为害级别增加呈现先升高后显著降低的趋势,说明黄金芽抗黑刺粉虱为害的能力较弱,需要加强黄金芽上黑刺粉虱发生的科学管理。

参考文献（References）

Chen CS, Wang QS, Huang J, Zhang YG, Wang XP, Chen RB, Wu GY, Zeng MS, 2007. Correlation between main biochemical components in new shoots of tea varieties and the selectivity of *Aleurocanthus spiniferus* (Quaintance). *J. Fujian Agric. For. Univ.* (*Nat. Sci. Ed.*), 36(6): 576–580. [陈常颂, 王庆森, 黄建, 张应根, 王秀萍, 陈荣冰, 吴光远, 曾明森, 2007. 茶树品种新梢主要生化成分与黑刺粉虱选择性的关系. 福建农林大学学报(自然科学版), 36(6): 576–580]

Chen HC, Xu N, Chen ZM, 2000. On the relationship between content of free amino acid in tea shoot and resistance of tea tree to tea pink mite *Acaphylla theae* Watt. *Acta Phytophy. Sin.*, 27(4):338–342. [陈华才, 许宁, 陈宗懋, 2000. 游离氨基酸含量与茶树抗螨性的关系. 植物保护学报, 27(4): 338–342]

Chen Y, Ni X, Buntin GD, 2009. Physiological, nutritional, and biochemical bases of corn resistance to foliage-feeding fall armyworm. *J. Chem. Ecol.*, 35(3): 297–306.

Czerniewicz P, Sytykiewicz H, Durak R, Borowiak-Sobkowiak B, Chrzanowski G, 2017. Role of phenolic compounds during antioxidative responses of winter triticale to aphid and beetle attack. *Plant Physiol. Biochem.*, 118: 529–540.

Duan YC, Yuan HG, Zhang YL, Sun XC, Zhang YY, 2010. Studies on the types of tea pests and major pest species occurrence rules in Shandong province. *Chin. Agric. Sci. Bull.*, 26(11): 284–289. [段永春, 袁洪刚, 张永亮, 孙绪聪, 张艳艳, 2010. 山东茶树虫害的种类及主要品种的发生规律研究. 中国农学通报, 26(11): 284–289]

Ge CM, Zhang JX, Sun QY, Ye T, Xia XJ, Zhang R, Ding Y, 2018. Feeding preference and adaptation of *Ectropis grisescens* (Lepidoptera: Geometridae) to different tea cultivars and their relationship with nutritional components in leaves of tea plants. *Acta Entomol. Sin.*, 61(11): 1300–1309. [葛超美, 张家侠, 孙钦玉, 叶涛, 夏先江, 张冉, 丁勇, 2018. 灰茶尺蠖对不同茶树品种取食选择与适应性及与茶树叶片营养成分的关系. 昆虫学报, 61(11): 1300–1309]

Guo JZ, Feng ZH, 2004. Occurrence and control of three main pests in tea area of Shandong Province. *J. Tea Commun.*, 26(3): 112. [郭见早, 冯志花, 2004. 山东茶区三种主要害虫发生规律及防治. 茶业通报, 26(3): 112]

Inbar M, Doostdar H, Leibee GL, Mayer RT, 1999. The role of plant rapidly induced responses in asymmetric interspecific interactions among insect herbivores. *J. Chem. Ecol.*, 25(8): 1961–1979.

Lee KP, Behmer ST, Sempson SJ, Raubenheimer D, 2002. A geometric analysis of nutrient regulation in the generalist caterpillar *Spodoptera littoralis* (Boisduval). *J. Insect Physiol.*, 48(6): 655–665.

Lennartsson T, Nilsson P, Tuomi J, 1998. Induction of overcompensation in the field gentian, *Gentianella campestris*. *Ecology*, 79(3): 1061–1072.

Li CM, He J, Gu AX, Su HH, Wu XX, Zhang HB, Xie YM, Wu YH, Zhou FC, 2017. Effects of *Bemisia tabaci* feeding on nutrients and resistance-related compounds of pepper varieties with different insect resistances. *Chin. J. Eco-Agric.*, 25(10): 1456–1462. [李传明, 何菁, 顾爱祥, 苏宏华, 吴晓霞, 张海波, 解雅梅, 邬亚红, 周福才, 2017. 烟粉虱取食对不同抗虫性辣椒品种营养物质和抗性物质的影响. 中国生态农业学报, 25(10): 1456–1462]

Liu MY, Lei CY, Li JJ, Lu SH, Bai RE, Tang QB, Yan FM, 2016. Differential physiological and biochemical responses of cucumber to the feeding by *Bemisia tabaci* B and Q biotypes. *Sci. Agric. Sin.*, 49(13): 2514–2523. [刘明杨, 雷彩燕, 李静静, 卢少华, 白润娥, 汤清波, 闫凤鸣, 2016. 黄瓜对 B 型和 Q 型烟粉虱取食的不同生理生化反应. 中国农业科学, 49(13): 2514–2523]

Liu YQ, Xu Z, Zhou ZK, Xie DX, Yang XH, 1999. Morphological and biochemical parameters of tea varieties resistant to *Polyphagotarsonemus latus*. *J. Sichuan Agric. Univ.*, 17(2): 187–191. [刘奕清, 徐泽, 周正科, 谢冬祥, 杨秀和, 1999. 茶树品种抗侧多食跗线螨的形态和生化特征. 四川农业大学学报, 17(2): 187–191]

Mao YX, Zou W, Ma XH, Lin NQ, 2009. Comparison of the population dynamics of *Empoasca vitis* (Göthe) on six tea varieties and their resistance to pests. *J. Huazhong Agric. Univ.*, 28(1): 16–19. [毛迎新, 邹武, 马新华, 林乃铨, 2009. 福建主要茶树品种间假眼小绿叶蝉种群动态及其抗虫性比较. 华中农业大学学报, 28(1): 16–19]

Mattson WJJr, 1980. Herbivory in relation to plant nitrogen content. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 11(1): 119–161.

McKenzie CL, Shatters RG, Doostdar HJr, Lee SD, Inbar M, Mayer RT, 2002. Effect of geminivirus infection and *Bemisia infestation* on accumulation of pathogenesis-related proteins in tomato. *Arch. Insect Biochem.*, 49(4): 203–214.

Qiu ZL, Yuan HG, 2005. Comprehensive control technology of main pests in tea garden of Shandong tea area. *J. Tea Commun.*, 27(2): 68–69. [邱忠莲, 袁洪刚, 2005. 山东茶区茶园主要害虫综合

防治技术. 茶业通报, 27(2): 68 – 69]

Ran W, Zhang J, Zhang X, Lin SB, Sun XL, 2018. Infestation of *Ectropis obliqua* affects the catechin metabolism in tea plants. *J. Tea Sci.*, 38(2): 133 – 139. [冉伟, 张瑾, 张新, 蔺松波, 孙晓玲, 2018. 茶尺蠖幼虫取食提高茶树儿茶素代谢响应强度. 茶叶科学, 38(2): 133 – 139]

Tan JC, Deng Y, 1994. Mechanism of plant disease resistance and insect resistance and breeding of tea varieties. *J. Tea Commun.*, (3): 13 – 16. [谭济才, 邓欣, 1994. 植物抗病虫性机制与茶树良种选育. 茶叶通讯, (3): 13 – 16]

Tian Y, Zhao Y, Zhang L, Mu W, Zhang Z, 2018. Morphological, physiological, and biochemical responses of two tea cultivars to *Empoasca onukii* (Hemiptera: Cicadellidae) infestation. *J. Econ. Entomol.*, 111(2): 899 – 908.

Tomczyk A, 2001. Physiological and biochemical responses of plants to spider mite feeding. In: Halliday RB, Walter DE, Proctor HC, Norton RA, Colloff MJ eds. Acarology: Proceedings of the 10th International Congress. CSIRO Publishing, Melbourne. 306 – 313.

Tong X, Gao XF, Jiang CJ, 2007. Compensatory photosynthesis physiology of tea plant for herbivory by *Ectropis oblique*. *J. Anhui Agric. Univ.*, 34(3): 335 – 339. [童鑫, 高香凤, 江昌俊, 2007. 茶树对茶尺蠖取食危害的补偿光合生理反应研究. 安徽农业大学学报, 34(3): 335 – 339]

Trumble JT, Kolodny-Hirsch DM, Ting IP, 1993. Plant compensation for arthropod herbivory. *Annu. Rev. Entomol.*, 38: 93 – 119.

Wang F, Chen YZ, Wang XP, You ZM, Chen CS, 2016. Leaf functional and photo synthetic characteristics in different leaves positions of tea plant. *J. Tea Sci.*, 36(1): 77 – 84. [王峰, 陈玉真, 王秀萍, 尤志明, 陈常颂, 2016. 茶树不同叶位叶片功能性状与光合特性研究. 茶叶科学, 36(1): 77 – 84]

Wang M, 2016. Study on the Effect of Different Leaf Hopper Biting on Tea Leaves. MSc Thesis, Southwest Agricultural University, Guangzhou. [王敏, 2016. 小绿叶蝉不同为害程度对茶叶品质的影响. 广州: 华南农业大学硕士学位论文]

Wang QS, Huang J, Chen CS, Wu GY, Zeng MS, Huang CM, Chen RB, 2009. Relationship between leaf structure of tea germplasm and its resistance to *Aleurocanthus spiniferus* (Quaintance). *J. Tea Sci.*, 29(1): 60 – 66. [王庆森, 黄建, 陈常颂, 吴光远, 曾明森, 黄春梅, 陈荣冰, 2009. 茶树种质叶片组织结构与其对黑刺粉虱抗虫性的关系. 茶叶科学, 29(1): 60 – 66]

Wang YN, Tang L, Hou Y, Wang P, Yang H, Wei CL, 2016. Differential transcriptome analysis of leaves of tea plant (*Camellia sinensis*) provides comprehensive insights into the defense responses to *Ectropis oblique* attack using RNA-Seq. *Funct. Integr. Genomics*, 16(4): 383 – 398.

Woods HA, 1999. Patterns and mechanisms of growth of fifth-instar *Manduca sexta* caterpillars following exposure to low- or high-protein food during early instars. *Physiol. Biochem. Zool.*, 72(4): 445 – 454.

Xu N, Chen XF, Chen HC, Chen ZM, 1996. Morphological and biochemical parameters of tea varieties resistant to pink mite (*Acaphylla theae* Watt). *J. Tea Sci.*, 16(2): 125 – 130. [许宁, 陈雪芬, 陈华才, 陈宗懋, 1996. 茶树品种抗茶橙瘿螨的形态与生化特征. 茶叶科学, 16(2): 125 – 130]

Zhang YL, Zhang JW, Yang Y, 1994. Investigation on the resources of insect resistant tea varieties and study on the resistance mechanism – Ⅱ. Correlation analysis of the characteristics of different tea varieties to the resistance of *Empoasca vitis*. *J. Tea Commun.*, (2): 4 – 6. [张贻礼, 张觉晚, 杨阳, 1994. 茶树抗虫品种资源调查及抗性机制研究——Ⅱ. 不同品种茶树特征特性对假眼小绿叶蝉抗性的相关分析. 茶叶通讯, (2): 4 – 6]

Zheng YT, Wang MX, Cui L, Han SJ, Yu PF, Han BY, 2017. Resistance of tea cultivars to the tea green leafhopper analyzed by EPG technique and their resistance related substances. *Acta Ecol. Sin.*, 37(23): 8015 – 8028. [郑雨婷, 王梦馨, 崔林, 韩善捷, 俞鹏飞, 韩宝瑜, 2017. 基于 EPG 技术分析茶树品种对茶小绿叶蝉的抗性及其相关的抗性物质. 生态学报, 37(12): 8015 – 8028]

Zhou DD, Liu CZ, Jiang SL, Ma F, Wang H, 2009. Physiological effect of *Bemisia tobacci* on cotton leaves under feeding pressure. *J. Gansu Agric. Univ.*, 44(1): 107 – 110. [周丹丹, 刘长仲, 姜生林, 马峰, 王海, 2009. 烟粉虱刺吸胁迫对棉花叶片生理的影响. 甘肃农业大学学报, 44(1): 107 – 110]

(责任编辑: 赵利辉)